

Artículo Científico

Diseño de un sistema electrónico de control de una fresadora mecánica convencional para el Instituto Técnico San Cristóbal

Electronic control system design of a mechanical conventional milling machine for San Cristóbal Technical Institute

1. José Marcio Bascopé Cáceres

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la conversión de una máquina fresadora de torreta convencional al sistema automatizado manejado por computadora.

Se implementaron motores de paso para reemplazar las operaciones manuales, los cuales fueron colocados a la fresadora utilizando bridas específicamente diseñadas para este propósito y un sistema que pueda controlar los motores con la computadora.

Una vez implementado el sistema se realizaron pruebas del equipo, las cuales consistieron en una evaluación técnica de maquinado de partes y una evaluación económica. En los dos casos se realizaron comparaciones con otras máquinas extranjeras usadas en el medio.

En las conclusiones se establece que, después de realizadas las pruebas con el equipo modificado, sus parámetros de funcionamiento son muy similares a las máquinas Control Numérico Computarizado (CNC) de marca, cumpliendo con todos los objetivos generales y específicos.

Palabras clave: Control de fresadora convencional. Sistema electrónico de control.

ABSTRACT

The conversion of a conventional turret milling machine to automated computer system was performed in this paper.

Stepper motors were implemented to replace manual operations, which were placed to the router using clamps specifically designed for this purpose and the use of a system that can control the motors with the computer.

Once we implemented the system, equipment tests were performed, which were the technical evaluation of machined parts and economic evaluation, in both cases comparing with foreign machines used in the middle.

The conclusions states that after testing with the team changed its operating parameters are very like the brand CNC machines, meeting all the general and specific objectives.

Keywords: Control conventional milling. Electronic control system.

1. Ingeniero Electrónico, titulado por la Universidad Privada del Valle Cochabamba. Instituto Técnico San Cristóbal.
mariobascope@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC) tuvieron su origen a principios de los años cincuenta en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en donde se automatizó por primera vez una gran fresadora.

Los sistemas de Diseño Asistido por Computador (CAD), acrónimo de Computer Aided Design, pueden utilizarse para generar modelos con muchas, si no todas, de las características de un determinado producto. Estas características podrían ser el tamaño, contorno y formas de cada componente, almacenadas como dibujos bi o tridimensionales. Una vez que estos datos dimensionales han sido introducidos y almacenados en el sistema informático, el diseñador puede manipularlos o modificar las ideas del diseño con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo del producto. Además, pueden compartirse e integrarse las ideas combinadas de varios diseñadores, ya que es posible mover los datos dentro de redes informáticas, con lo que los diseñadores e ingenieros situados en lugares distantes entre sí pueden trabajar como un equipo.

Hoy en día, con la ayuda de los lenguajes conversacionales y los sistemas CAD/CAM (o su equivalente DISEÑO Asistido por Computador/Manufactura Asistida por Computadora), los equipos CNC permiten a las empresas producir con mucha mayor rapidez y calidad sin necesidad de tener personal altamente especializado [1].

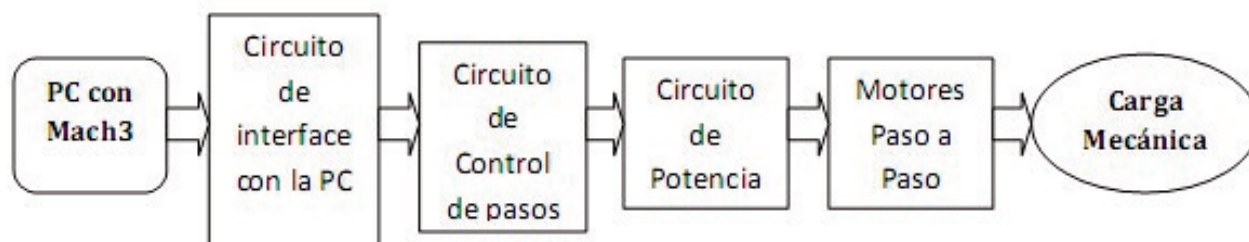
Planteamiento del problema

Algunas instituciones de enseñanza donde se capacitan técnicos operativos no cuentan con grades presupuestos para adquirir estas máquinas, pero tienen la necesidad de poder contar con equipos de control numérico mucho más económicos y pequeños de fácil mantenimiento y reparación, que cuentan con las mismas características de operación a las que se encuentran disponibles para la industria.

El taller de Mecánica Industrial del Instituto Técnico San Cristóbal requiere para sus prácticas en la materia de Maquinas de Control Numérico de un sistema electrónico para el control de una fresadora mecánica convencional, convirtiéndola en una maquina fresadora de control numérico (Fresadora CNC) de bajo costo que realice el mecanizado de piezas complejas y precisas de producción masiva en materiales blandos.

El sistema que se ha implementado es un sistema de lazo abierto, éste consta de un circuito de interface que recibe las señales de mando desde la PC, circuito de control de pasos y circuito de potencia para controlar los motores Paso a Paso (PAP); este sistema deberá poder controlar la carga mecánica (figura N° 1).

Figura N° 1. Diagrama de bloques de los elementos que se usan para controlar un eje del sistema



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Motor Paso a Paso

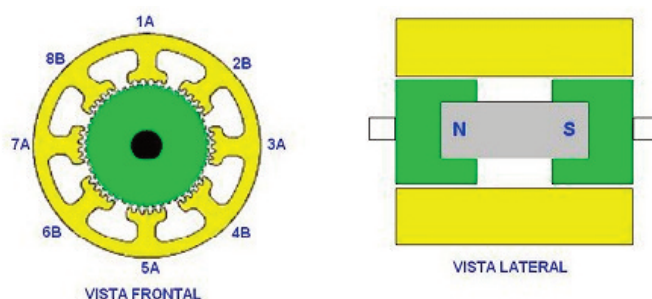
La ventaja fundamental que poseen los motores PAP, respecto a otros tipos de motores, es que no necesitan en principio un sistema de realimentación para controlar la velocidad o posición del motor. Los driver de los motores PAP tienen básicamente 2 entradas: una de dirección (DIR), con la que se indica en qué sentido gira el motor, y otra de reloj (CLK), por la cual un pulso corresponde un paso que dé el motor; esto permite controlar de una forma muy sencilla la posición y la velocidad del motor, ya que si por la entrada de CLK hay una señal cuadrada de 200Hz y si el motor es de 200 pasos/revolución (1,8°), girará a una vuelta por segundo. De todas formas, los motores PAP son muy sensibles a las variaciones de carga; una variación fuerte en el par que tiene que realizar el motor puede producir que éste pierda el paso y, por tanto, que pierda la posición real del motor al no tener realimentación. Un fallo en la posición del motor puede tener consecuencias peligrosas, motivo por la cual el sistema contará con realimentación [1].

Estructura física y características

El principio de funcionamiento de los motores PAP se basa en lo siguiente: cuando una barra de hierro o acero se suspende (es libre de rotar) dentro de un campo magnético, ésta se alinea con el campo, de manera que la reluctancia total del circuito sea la mínima posible.

Si se cambia la dirección del campo, la barra girará con un determinado par. En la figura N° 2 se puede ver, en la vista frontal, que el estator está formado de 8 polos magnéticos con 5 dientes cada uno y una bobina en cada uno de esos polos (motor de $1,8^\circ$ por paso). En la vista lateral se puede observar que el rotor está formado por un imán permanente que posee una tapa en cada extremo con 50 dientes cada una (no se representan los dientes en el dibujo), estando una de estas tapas polarizada como N y la otra como S; además, el tamaño de los dientes es el mismo que el del estator, pero están desfasados de manera que el diente coincide en el otro extremo con un hueco. Los dientes del estator tienen todos igual tamaño, pero están desfasados $1,8^\circ$ entre los polos [3].

Figura N° 2. Estructura física de un motor Paso A Paso



Fuente: www.mcblec.com

Interfaz de comunicación hacia el sistema de control

Es necesario especificar la interfaz de comunicación que se maneja entre la PC y la tarjeta principal. La comunicación entre la PC y la tarjeta principal es paralela, por aquí se envían los datos hacia los actuadores y se recibe las señales de los Limit y Home Switchs.

La distribución de pines del adaptador se presenta en la siguiente página (tabla N° 1).

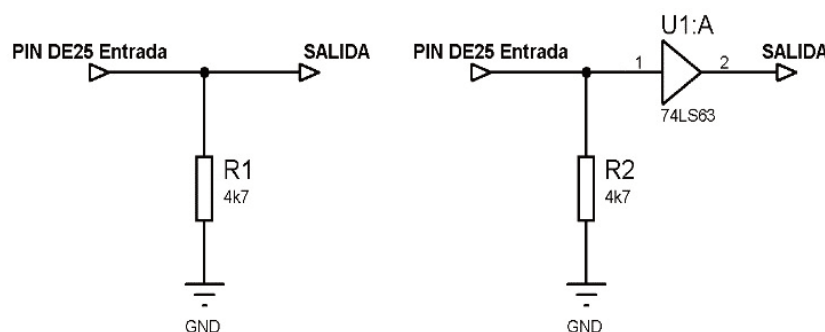
Tabla N° 1. Distribución de pines del adaptador

PIN DB25	DESCRIPCIÓN
Pin 1	NC
Pin 2	NC
Pin 3	NC
Pin 4	Pasos eje Y
Pin 5	Dirección eje Y
Pin 6	Pasos eje X
Pin 7	Dirección eje X
Pin 8	Pasos eje Z
Pin 9	Dirección eje Z
Pin 10	Límite +X; Límite -X
Pin 11	Límite +X; Límite -X
Pin 12	Límite +X; Límite -X
Pin 13	Home X, Y, Z
Pin 14	Habilitación ejes X, Y, Z
Pin 15	Parada o Stop
Pin 16	Salida 1; Relé 1 de Splinde
Pin 17	Salida 2; Relé 2
Pin 18 a 26	PC GND

Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Hay distintas maneras de conectar las señales de salida de algún pin del conector DB-25 y dos de ellas se muestran en la figura N° 3. En el lado izquierdo se muestra una configuración que utiliza una resistencia de pull-up, cuya función es definir claramente los estados alto o bajo de la señal (por ejemplo, 5 o 0 volts); en el derecho se tiene una configuración similar, pero con la adición de un búfer 74HC245 (el cual es un seguidor de la señal de entrada y se prende o apaga en correspondencia con ésta) que permite un aislamiento de la señal de salida con respecto al pin del puerto como una medida de seguridad, además de permitir utilizar algunos miliamperios para alguna señal activadora de transistor, led, etc. Esta es la configuración utilizada en la tarjeta realizada [4].

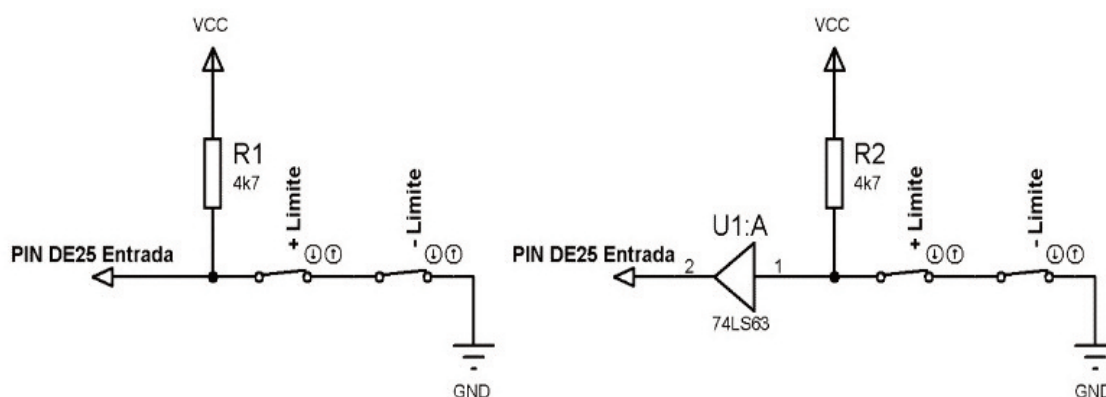
Figura 3. Conexión en pin DB25 Salida



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Las señales de entrada pueden ser de switches límite, el botón de parada de emergencia, algún sensor, etc. Similar al caso de los pines de salidas, para las entradas puede utilizarse la resistencia de pull-up sola o con la adición de un búfer, tal como se muestra en la figura N° 4. En este caso se utiliza un botón normalmente abierto y la tarjeta recibe una señal alta mientras éste no se presiona. Al hacerlo se cierra el circuito y el nodo de la resistencia conectado al pin de entrada baja a tierra e ingresa entonces una señal baja.

Figura N° 4. Conexión en pin DB25 Entrada



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Diseño de la lógica secuencial para el circuito de giros y pasos

Los motores PAP con los que se cuenta son medianos NEMA 23 y requieren mayor torque para garantizar el movimiento de los ejes sin que se pierdan pasos. Para ello se diseña el control energizando dos bobinas a la vez, el cual proporciona mayor toque a los motores, ya que se energiza dos bobinas para dar un paso. El diseño contempla el sentido de giro y la secuencia de pasos.

Al ser un motor de 1,8° por paso, el giro completo lo realizará dando 200 pasos. En la tabla N° 2 se muestra la secuencia de pasos de un motor de pasos unipolar.

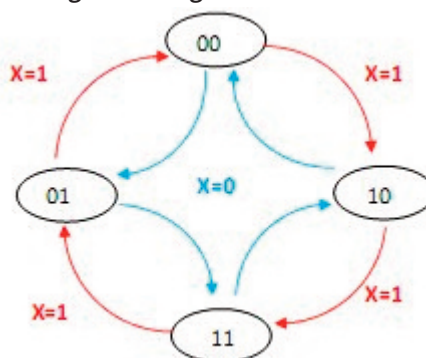
Tabla 2. Secuencia de pasos de un motor Paso a Paso unipolar

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Haciendo un análisis a la tabla N° 2, se puede notar que la bobina C es el inverso de la bobina A; lo mismo ocurre con la bobina D que es el inverso a la bobina B. Por lo tanto, para el diseño del circuito de secuencia de giro y pasos no es necesario incluir en el diagrama de estados como se ve en la figura N° 5 [4].

Figura 5. Diagrama de estados



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Del diagrama de estados se realiza la tabla de verdad del diseño secuencial, para la cual se utiliza Flip Flop tipo D, cuya entrada de reloj (CLK) representa la señal de pasos, y la variable X representa la señal de dirección, tal como se puede observar en la tabla N° 3.

Tabla N° 3. Tabla de verdad para diseño secuencial

X	Antes		Después		FLIP FLOP Tipo D	
	A	B	A+t	B+t	DA	DB
0	0	0	0	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	0	1

Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Donde x representa el control del sentido de giro, A y B las bobinas del motor.

Simplificación por Mapas de Karnaugh

		A'B'	A'B	AB	AB'
		00	01	11	10
X	0		1	1	
	1	1			1

		A'B'	A'B	AB	AB'
		00	01	11	10
X	0	1	1		
	1			1	1

Las ecuaciones extraídas de los mapas de Karnaugh son:

• Para DA:

$DA = X'B + XB'$ Compuerta XOR por tanto

$DA = X(+)B$

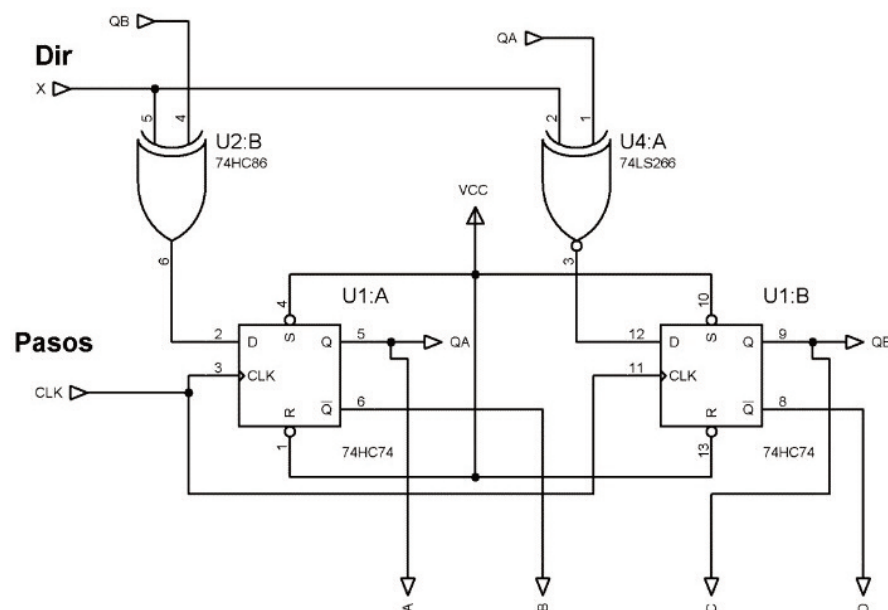
• Para DB:

$DB = X'A' + XA$ Compuerta XNOR

$DB = (X(+)A)'$

Graficando estas ecuaciones, DA y DB nos dan el circuito controlador del sentido de giro y la secuencia de pasos para los motores como se muestra en la figura N° 6.

Figura N° 6. Circuito lógico de control de Pasos



Fuente: Elaboración propia, junio de 2014

Diseño del circuito de control de potencia

Como se vio, el motor está formado por varias bobinas que han de ser activadas y desactivadas secuencialmente; sin embargo, la característica fundamental de la bobina es que ésta intenta oponerse a las variaciones de intensidad mediante variaciones de tensión, lo que se expresa matemáticamente como:

$$V_L = -L \frac{di}{dt}$$

Donde:

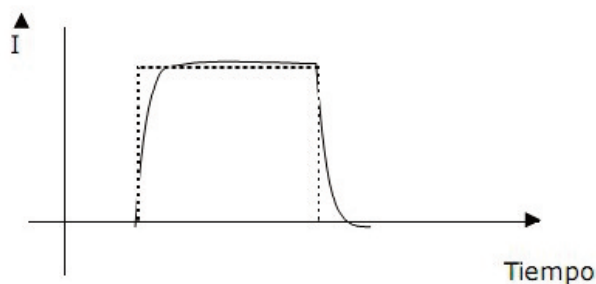
- V_L es el voltaje de la bobina
- L inductancia de la bobina

Si se resuelve la ecuación para un circuito con una tensión de alimentación V y una resistencia de carga (si la hay) más resistencia interna de la bobina igual a R , se tiene que la carga de la bobina vendrá dada por la siguiente ecuación.

$$i_L = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); i_L = I_f \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \tau = \frac{L}{R}$$

Esto significa que desde el momento en que se activa una bobina hasta que ésta alcanza su corriente nominal, pasará un periodo de tiempo (" τ " se denomina constante de tiempo y representa el tiempo de carga a un 63% del nominal, para calcular el tiempo al 95% se utiliza el valor 3τ); esto se puede ver más claramente en la figura N° 7, en la que se representa la intensidad teórica (la señal rectangular) y la real, en la que los frentes se curvan debido a los retrasos en la carga y descarga de la bobina [2].

Figura N° 7. Intensidad de corriente de una bobina



Fuente: Elaboración propia, junio de 2014

Se debe tener en cuenta que el par del motor depende directamente de la corriente que circula por la bobina, de tal forma que en estos flancos de subida y bajada el par del motor disminuye e incluso se anula, pudiendo producir pérdidas de paso y una limitación considerable de la velocidad máxima. Es por esto por lo que es tan importante minimizar lo más posible estos flancos.

Control por corriente forzada (L/NR)

Para el diseño del circuito controlador de potencia se toman las características (tabla N° 4) del motor unipolar de 6 hilos NEMA 23 dadas por el fabricante.

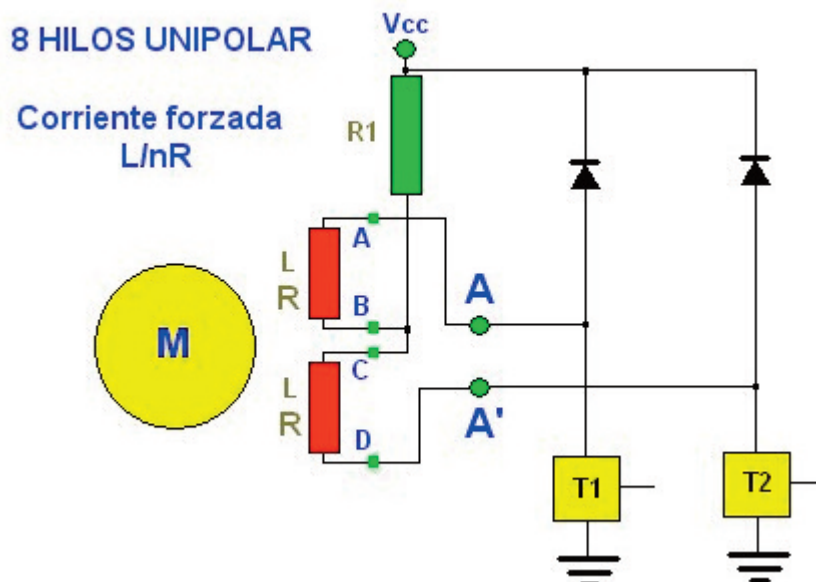
Tabla N° 4. Características eléctricas de un motor Paso A Paso

Características	V
Voltaje nominal (V)	5.4
Corriente nominal	1.5
Resistencia por bobina Ω	3.6
Inductancia por bobina (mH)	6 mH
Par de mantenimiento (mNm)	9 Kg/cm
Precisión del ángulo de paso (%)	+ - 5%
Ángulo de paso	1.8°

Fuente: Sinotech Shanghai

Este método a utilizar es de corriente forzada (L/nR). Consiste en aumentar en un factor “n” la resistencia de carga de la bobina para reducir τ en un factor $1/n$. Normalmente, el valor de n está entre 2 y 10. Para este ejemplo se utiliza el valor de 4, lo que implicará que τ se reducirá a la cuarta parte ($\tau = L/4R$). Si se aumenta R, también se tendrá que aumentar la tensión de alimentación en el mismo factor para mantener la intensidad nominal del motor. El esquema básico es el que se observa en la figura N° 8 [4].

Figura N° 8. Esquema de corriente forzada en configuración unipolar



Fuente: www.mcbtec.com,...

El diodo evita que se generen altas tensiones que puedan destruir el transistor. Estos se pueden conectar en la configuración que se indica o bien en paralelo con la bobina [5]. A continuación, se realizarán los cálculos del circuito para bobinas en paralelo.

Al colocar las bobinas en paralelo, la resistencia de las bobinas será la mitad, la tensión nominal de las dos bobinas en paralelo es la misma y la corriente nominal vendrá dividida por la raíz cuadrada de 2, pero multiplicada por 2, ya que las bobinas están en paralelo.

- Cálculo de R1: El valor de R1 viene dada por la fórmula:

$$R1 = (n - 1) \frac{R}{2}$$

Como $n=4$ se tiene:

$$R1 = (4 - 1) \frac{3.6}{2}$$

$$R1 = 5.4\Omega$$

- Calculo de Vcc: El valor de Vcc vendrá dado por la fórmula:

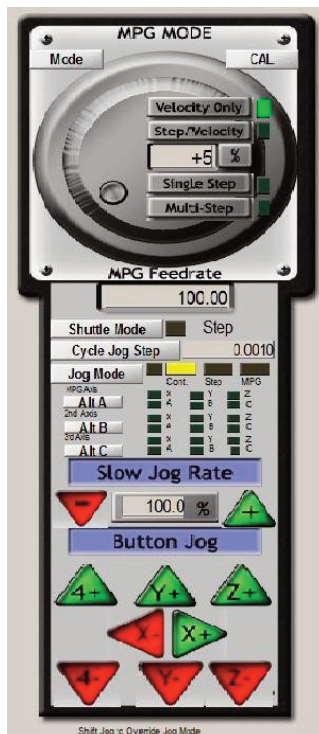
$$V_{cc} = V_n + 2 \frac{I_n}{\sqrt{2}} * R1$$

Como $V_n = 5.4V$, $I_n = 1.5A$ y $R1 = 5.4\Omega$ se tiene:

$$V_{cc} = 5.4V + 2 * \frac{1.5A}{\sqrt{2}} * 5.4\Omega$$

$$V_{cc} = 16.8V$$

Figura N° 10. Controles de avance



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

En este sentido, se consideran comúnmente tres factores para tener una referencia del rendimiento real de un equipo, que son:

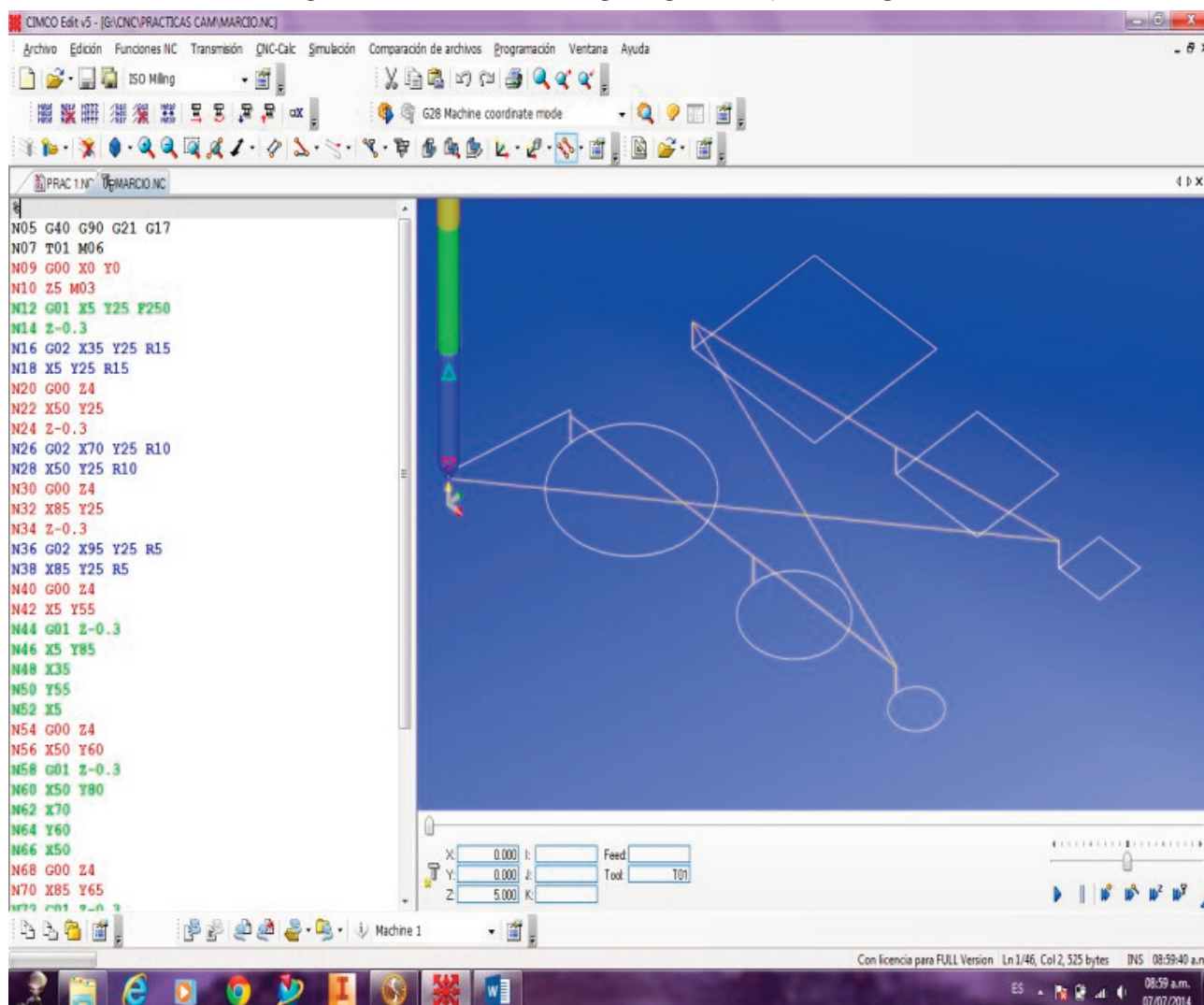
- **Precisión:** es la diferencia entre una medida comandada y la real lograda por el sistema.
- **Repetitividad:** es el rango de posiciones logradas por un sistema cuando es comandado repetidamente bajo las mismas condiciones para que se mueva a una misma posición. La repetitividad puede ser a su vez medida de manera unidireccional o bidireccional. En el primero caso se ignora la respuesta del sistema ante un cambio en el sentido de giro y en el segundo se mide la capacidad para colocarse en la misma posición por ambos lados.
- **Resolución:** es el mínimo movimiento posible que puede lograr el sistema.

Se hicieron dos pruebas para conocer estos parámetros. La primera consistió en dibujar cuadrados comenzando con un cuadrado de lados 30x30mm, otro de 20x20mm y finalmente de 10x10mm de lado. Finalmente, se dibujó círculos de diámetro 30mm, otro de 20mm y finalmente de 10mm de diámetro. El resultado del maquinado se muestra en la figura N° 12, donde se puede observar en los círculos una ligera desviación; en los cuadrados no se pudo obtener alguna desviación. Luego de tomar las medidas, se repitió las mismas gráficas sobre la anterior, se notó un ligero ensanchamiento de las líneas alrededor de 0,01mm que sería un dato estimado según las medidas que se tuvo [6].

Código G para la prueba del sistema

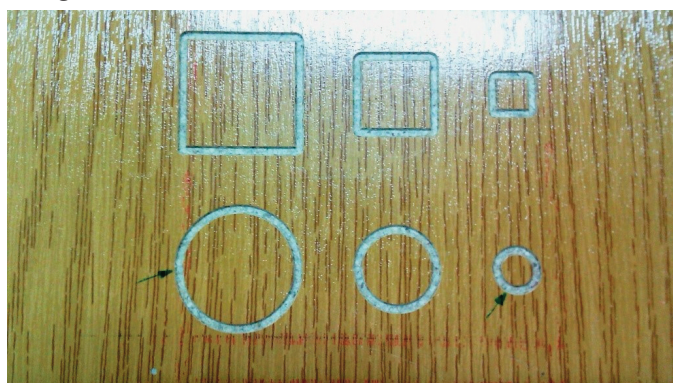
Se utilizó el programa inventor CAD para realizar el dibujo de las circunferencias y los cuadrados, (del mismo se extrae el siguiente código G). Este código es utilizado por el programa CIMCO (CAM) para realizar el trazado de las figuras, como se muestra en la figura N° 11, posteriormente es utilizado para el mecanizado con el sistema, con el cual se mide las desviaciones que existían en los tres ejes.

Figura N° 11. Trazado de las figuras generado por el código G



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

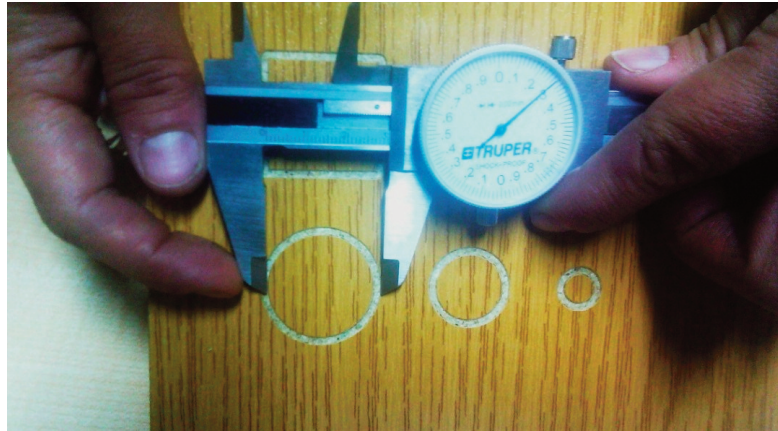
Figura N° 12. Prueba del sistema electrónico de control



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Se utilizó calibrador pie de rey de dos centésimas para tomar la medida del desvío en cada eje (figura N° 13) y se obtuvieron los siguientes datos como se muestra en la siguiente tabla.

Figura N° 13. Medición del desvío en el eje X, Y y Z



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

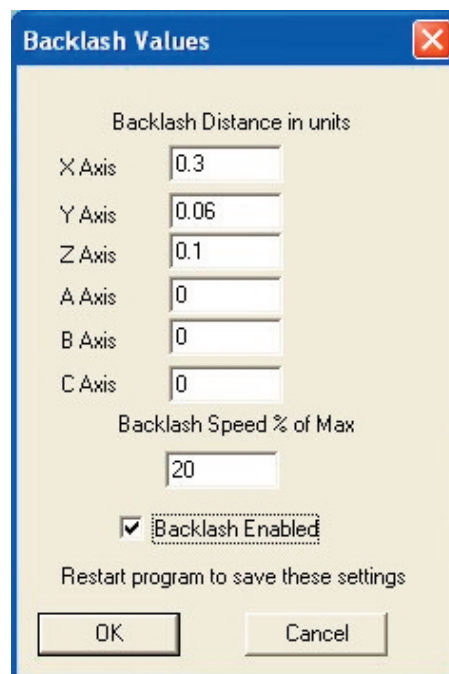
Tabla N° 5. Datos del desvío en los ejes X, Y, Z

EJES	Desvío
EJE X	0,3mm
EJE Y	0,06mm
EJE Z	0,1mm

Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Con estos datos de la tabla N° 5 se configuró el Mach3 para corregir estos desvíos como se muestra en la figura N° 14, posteriormente se realizó de nuevo la prueba.

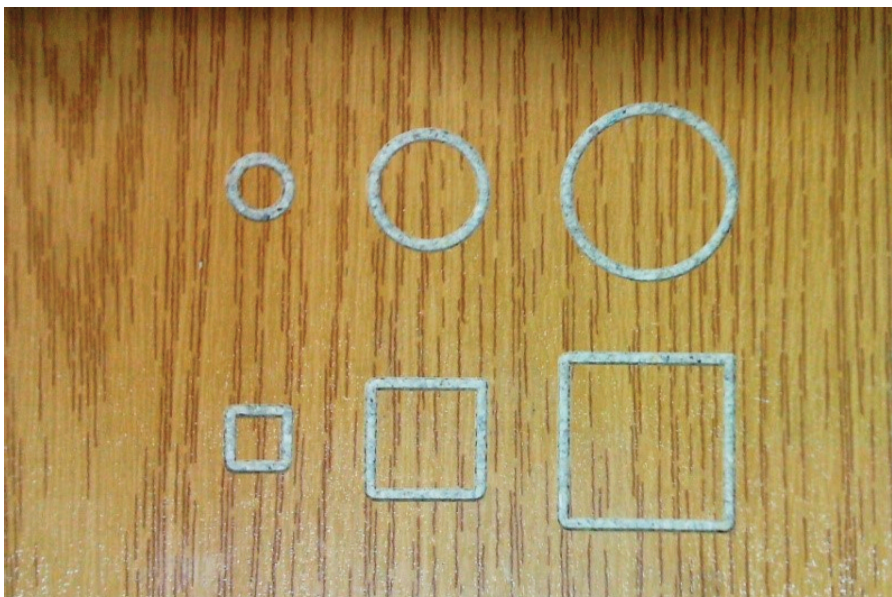
Figura 14. Configuración de holguras en Mach3



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Luego de la segunda prueba no se nota ningún desvío en los ejes, con el calibrador pie de rey de dos centésimas no se puede medir alguna variación que pueda existir, por lo que las desviaciones estarían por debajo de 0,02mm.

Figura N° 15. Maquinado de la pieza después de configurar en Mach3



Fuente: Elaboración propia, junio 2014

Por tanto:

- a) La Precisión del sistema es menor de 0.02mm por eje
- b) La repetitividad es bidireccional en los tres ejes
- c) La resolución está dada por:

- Paso motor por unidad = 80 pasos Cada 1mm
- Resolución = 1mm/80 pasos
- Resolución = 0,125mm (0,0125mm por cada paso)

CONCLUSIONES

El sistema electrónico de control para una fresa mecánica convencional fue implementado con éxito, el cual está en pleno funcionamiento, además fue posible generar un gran abanico de posibilidades para aplicaciones de maquinado.

Para la implementación de la fresadora se seleccionó la configuración cinemática adecuada.

Para implementar un equipo barato y de utilidad para los estudiantes y docentes en el instituto San Cristóbal se tuvo que estudiar el programa Mach3 y la configuración más idónea es decir más la forma más exitosa para conseguir esto.

El sistema electrónico y de potencia fue diseñado de forma acertada, ya que no sufrió fallas ni daños durante las etapas de prueba exhaustivas realizadas en el equipo.

Se comprobó que la precisión en el tallado de piezas está dentro del rango aceptable para la realización de las clases en el instituto.

RECOMENDACIONES

Antes de operar la máquina se deben conocer sus características técnicas, tales como: recorridos de los ejes, velocidades máximas tanto del mandril como del husillo, materiales que se pueden mecanizar, etc.

Se recomienda seguir las normas de seguridad (tanto para la máquina como para el operario) antes, durante y después del mecanizado, ya que la máquina puede causar lesiones por quemaduras o corte; además, ayuda al operario para que se acostumbre al momento de utilizar una máquina a nivel industrial.

Se debe verificar de forma regular los parámetros de configuración o calibración del fresador dentro del software Mach3, con el fin de arreglar algún tipo de desconfiguración que se haya dado; además, para obtener los mejores resultados de mecanizado posibles.

Se puede adicionar un sistema en futuras mejoras del proceso de conversión que permita realizar un cambio de herramienta automática para disminuir el tiempo de mecanizado.

Otra mejora operativa sería acoplar un cuarto eje en esta máquina, lo que permitiría hacer piezas con formas mucho más complejas y otras adaptaciones según se requiera.

El mínimo hardware requerido de la PC para que el sistema funcione consiste en: tarjeta madre con puerto paralelo incorporada o conector PCI libre para instalar una tarjeta de puerto paralelo, procesador Pentium I, 2Mb de memoria RAM, espacio en disco duro de 200Mb y tarjeta de video SVGA con una resolución de pantalla de 1024 x 768 pixels. En cuanto al software, Sistema operativo Windows XP o Windows 2000.

Ya que Mach3 debe ser capaz de enviar muy exactamente las señales de control al sistema, se debe cerrar cualquier otro programa sólo al momento que se esté maquinando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IBRAHIM Zeid, Mastering CAD/CAM, Monterrey, Mc Graw Hill, 1 de julio de 2004.
- [2] CONTI Francisco, Motores Paso a Paso, Alsina, s.a.
- [3] Robótica y posicionamiento, MCBtec www.mcbtec.com (15 de abril 2014)
- [4] HERMORA DONATE, Antonio. Electrónica digital fundamental y programable. Barcelona: Marcombo, 2010.
- [5] MOHAN, Ned; UNDERLAND, Tore; ROBBINS, William. Electrónica de potencia. Monterrey: McGraw Hill, 2009.
- [6] CRUZ TERRUEL, Francisco. Control numérico y programación II. Barcelona: Marcombo, 2010.